

비도로 차량용 디젤엔진의 배기가스 저감에 관한 연구[§]

조규백*[†] · 김홍석* · 강정호**

* 한국기계연구원 그린동력연구실, ** 자동차부품연구원 그린연료기술센터

A Study of the Reduction of Diesel-Engine Emissions for Off-Road Vehicles

Gyu Baek Cho*[†], Hong Suk Kim* and Jeong Ho Kang**

* Dept. of Engine Research, Korea Institute of Machinery & Materials,

** Center of Green Fuel Technology, Korea Automotive Technology Institute

(Received December 13, 2010 ; Revised February 22, 2011 ; Accepted March 14, 2011)

Key Words: Off-road Vehicle(비도로용 차량), Particulate Matter(입자상물질), NOx(질소산화물), Exhaust Gas Recirculation(배기가스 재순환), Diesel Particulate Filtertrap(매연여과장치)

초록: 비도로 차량용 디젤엔진의 Tier 4 interim 규제를 만족하기 위하여 입자상물질과 질소산화물 배출량은 현행 규제 대비 각각 95%, 30% 저감되어야 하며, 입자상 물질을 저감하기위한 방법으로 디젤산화촉매, 부분유량 매연 여과장치 및 매연여과장치가 비도로 차량용 디젤엔진에 적용될 수 있다. 또한 질소산화물을 저감하기위해 배기가스 재순환방법, 선택적 환원촉매와 회박 질소산화물 포집장치 등이 적용될 수 있다. 본 연구에서는 56kW급 off-road 차량에서의 입자상물질과 질소산화물을 저감하기위해 매연여과장치와 고압루프 배기가스재순환 시스템이 연구되었다. 실험결과로서 디젤산화촉매와 매연여과장치는 입자상물질을 저감하는데 매우 효과적이었으며 낮은 배압과 함께 출력손실도 5%이내였다. 고압루프 배기가스재순환을 적용한 결과 중·저부하 조건에서 효과적으로 질소산화물을 저감하였으며 배기가스재순환율이 높을수록 질소산화물의 저감율도 증가하였다.

Abstract: To meet the requirements of the Tier 4 interim regulations for off-road vehicles, emissions of particulate matter (PM) and nitrogen oxides (NOx) must be reduced by 95% and 30%, respectively, compared to current regulations. In this research, both the DPF and HPL EGR systems were investigated, with the aim of decreasing the PM and NOx emissions of a 56-kW off-road vehicle. The results of the experiments show that the DOC-DPF system is very useful for reducing PM emissions. It is also found that the back pressure is acceptable, and the rate of power loss is less than 5%. By applying the HPL EGR system to the diesel engine, the NOx emissions under low- and middle-load conditions are reduced effectively because of the high differential pressure between the turbocharger inlet and the intake manifold. The NOx emissions can be decreased by increasing the EGR rate, but total hydrocarbon (THC) emission increases because of the increased fuel consumption needed to compensate for the power loss caused by EGR and DPF.

- 기호설명 -

- In : 흡기다기관(Intake manifold)
- Ex : 배기다기관(Exhaust manifold)
- Amb : 대기조건(Ambient)

1. 서론

On-road용 디젤 차량의 경우 커먼레일을 활용한 전자식 연료분사시스템, 배기가스 재순환시스

템(EGR: Exahsut Gas Recirculation), 가변식 터보차저(VGT: Variable Geometry Turbocharger) 및 후처리 장치 적용으로 출력 및 연비를 증가시킬 뿐만 아니라 강화된 배기규제를 충분히 만족시키고 있다. 특히 대표적인 후처리 장치인 디젤산화촉매(DOC: Diesel Oxidation Catalyst)와 매연포집장치(DPF: Diesel Particulate Filtertrap)를 장착함으로써 입자상물질(PM: Particulate Matter)의 경우 약 90%이상 저감이 가능하며 trade-off 관계에 있는 질소산화물(NOx: Nitro oxide)은 VGT에 따른 EGR율의 증가와 적용범위의 확장을 통해 1차적으로 NOx 배출량을 감소시키고 2차로 LNT(Lean NOx trap), LNC(Lean NOx catalyst), Urea-SCR

§ 이 논문은 대한기계학회 2010년도 추계학술대회 (2010. 11. 3.-5., ICC제주) 발표논문임

† Corresponding Author, gybcho@kimm.re.kr

© 2011 The Korean Society of Mechanical Engineers

(Selective catalyst reaction) 등의 다양한 후처리 기술을 통해 배출량을 현저히 저감시키고 있다.^(1~5)

Off-road 차량은 농기계, 건설장비, 선박 등을 들 수 있으며 이중 선박은 국제해사기구(IMO: International maritime organization)에 의해 규제 받는다. 현재 off-road 차량에 사용되는 디젤엔진은 기계식 연료분사 시스템을 사용하며 분사압력이 낮아 PM의 배출량이 많고 또한 배기가스 재순환 같은 배출가스 저감을 위한 기술이 전혀 적용되고 있지 않아 NOx의 배출량도 크다.

현재 트랙터, 콤파인 등과 같은 농기계용 디젤엔진의 경우 WGT(Waste gate turbocharger)사용과 밸브오버랩 기간을 조정한 내부 EGR 등을 통해 배기규제인 Tier 3수준을 만족하고 있다. 그러나 Table 1에 나타낸 바와 같이 off-road 차량의 배기규제도 강화되어 출력에 따라 Tier 4 interim 혹은 Tier 4 배기수준을 만족시켜야 되는 상황에 직면해 있다.^(6,7) 이 경우 PM의 경우 95%, NOx의 경우에도 최소 30%이상 저감시켜야 한다.

Off-road 차량에서 발생하는 PM은 DOC와 DPF를 통해 배출량의 상당부분을 저감시킬 수 있으나 운전특성이 on-road 용과 크게 다르고 장치의 크기 및 사양에 따라 엔진의 출력 및 연비에 큰 영향을 미치기 때문에 최적화 연구가 필요하며, NOx의 경우에도 현재 사용되는 기계식 연료펌프에 의해 분사시기와 연료량이 제어되기 때문에 연료시스템을 통해 NOx를 감소시키는 데는 한계

가 있어 새로운 저감기술이 적용되어야 한다.

따라서 본 연구에서는 PM을 저감하기 위해 금속담체의 DOC와 세라믹 담체의 DPF 시스템을 적용하였으며 NOx 저감을 위해 전자제어방식의 HPL(High pressure loop) EGR 시스템을 적용함으로써 Tier 4 interim 규제 만족을 위한 가능성을 평가하고자 한다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 실험장치

Fig. 1은 본 연구에 사용된 실험장치의 개략도를 나타낸 것이다. 실험용 엔진은 Table 2에 나타난 바와 같이 4기통, 3400cc 디젤엔진이며 VE형 연료펌프를 사용하고 WGT 과급기를 통해 공기를 압축하여 연소실로 공급한다.

PM 및 매연(smoke)은 마이크로 희석터널 (Microtrol-5, NOVA)과 광투과식 매연측정장치(415S, AVL)를 통해 각각 측정하였으며 NOx, THC (Total Hydro-Carbon) 등의 배출가스는 배기분석기(MEXA 9100 DEGR, Horiba)를 통해 측정하였다.

Table 1 Emission Standard for Tier 3 vs Tier 4

구 분		Tier3	Tier-4 Interim
PM(g/kWh)	75≤HP≤100	0.4	0.02
NOx+NMHC (g/kWh)	75≤HP≤100	4.7	NOx 3.4 NMHC 0.19

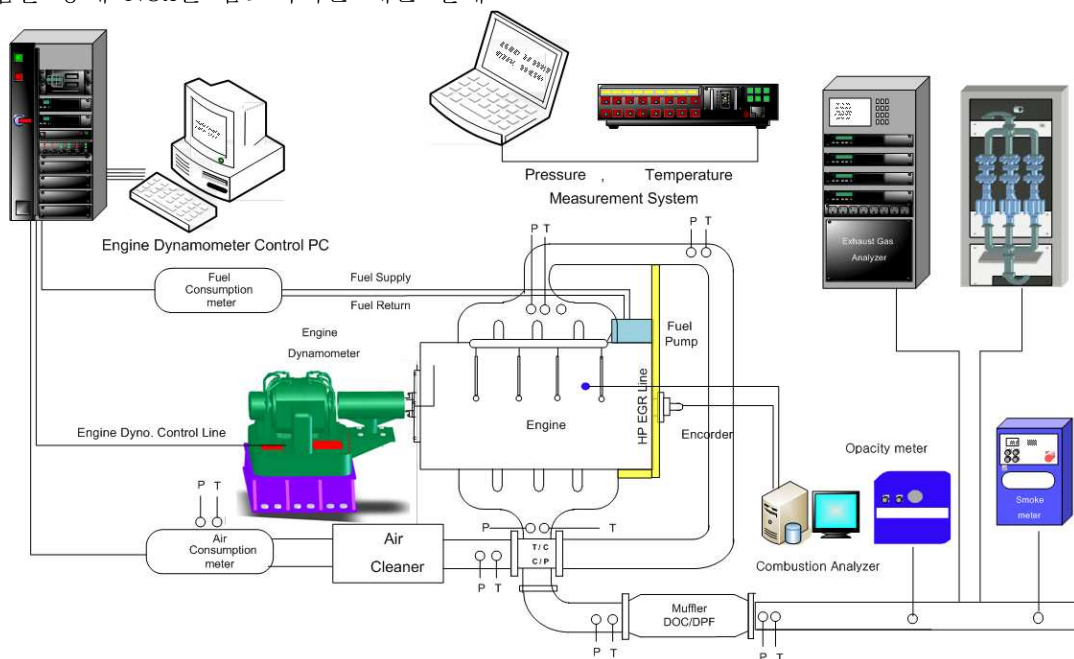


Fig. 1 Schematic diagram of experimental set-up

실험 조건은 엔진셀 내부 온도를 $25 \pm 5^\circ\text{C}$ 를 유지하면서 엔진 냉각수 및 오일온도를 각각 80°C , 70°C 로 일정하게 유지하기 위해 시험전에 규정된 모드를 운전하였다. 각 실험은 3회씩 실시하였으며 재현성을 확인하였으며 데이터는 이들 중 중간 값을 사용하였다.

본 연구에 적용된 EGR 시스템은 HPL EGR 타입으로 Fig. 1에서 보는 바와 같이 터보 차저 전단에서 흡기 매니폴드로 배기가스가 순환되는 방식이다. EGR량은 DC 모터에 의한 포핏타입의 밸브 양정으로 조절되며 제어는 PWM(Pulse Width Modulate) 방식으로 이루어진다.

Table 2 Engine Specification

Engine	3.4L Water Cooled, T/C
Power	75HP(56kW)
Injection type	VE pump, Direct injection
Injection Press.	100Mpa
Valve type	4 Valve

Table 3 Specifications of DOC & DPF

	DOC	DPF
Material	Metal foam	Cordierite
Volume	2.7 liter	5.7 liter
Cell size	580, 800, 1200 μm	200CPSI
Size	57.3mm(ID) X 125mm(OD) X 280mm(L)	7.5"(D) X 8"(L)

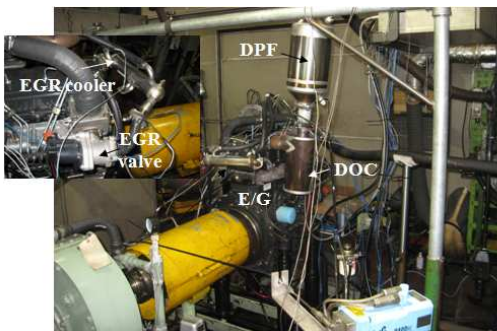


Fig. 2 Photograph of EGR & DPF system on Engine

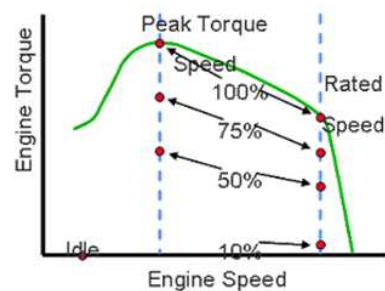
Fig. 2는 엔진에 장착된 EGR 시스템과 PM 저감을 위해 장착된 DOC와 DPF 장치의 설치 모습을 보여준다. DOC의 경우 산화촉매 역할뿐만 아니라 PM의 일부분을 포집하기 위해 금속폼 필터를 사용하였으며 DPF의 경우 일반적인 코디에라이트 필터에 백금(pt)을 코팅하였다. Table 3은 후처리장치의 자세한 사양을 보여준다.

2.2 실험방법

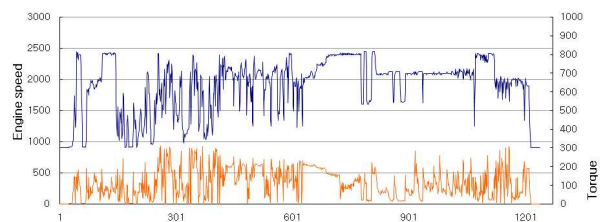
본 연구는 크게 EGR적용과 후처리장치 적용의 두 가지 부분으로 나눌 수 있다. 우선, EGR 적용에 대한 연구가 선행되어야 하며 이후 후처리 적용을 통해 종합적인 저감특성의 평가가 이루어져야 한다.

우선, EGR의 경우 기본엔진의 NOx 배출특성을 조사하고 EGR 적용을 위해 EGR 율을 맵핑하였다. 이때 EGR을 증가에 따라 흡기의 과도한 온도 상승을 막기 위해 일정흡기온도를 기준으로 EGR율을 제한하였으며 이외에도 THC, 제동연료 소모율(BSFC: Brake Specific Fuel Consumption) 등도 참고하였다.

EGR율은 다음과 같은 식 (1)을 이용하여 계산하였다. 여기서 $\text{CO}_{2[\text{In}]}$: 흡기매니폴드, $\text{CO}_{2[\text{Ex}]}$: 배기관, $\text{CO}_{2[\text{Amb}]}$: 대기 중 CO_2 농도이다.



(a) KC1 - 8mode for Tier 3



(b) NRTC mode for Tier 4

Fig. 3 Test mode for Tier 3 & Tier 4

$$EGR_{rate} = \frac{CO_{2[In]} - CO_{2[Amb]}}{CO_{2[Ex]} - CO_{2[Amb]}} \quad (1)$$

이 후 적용 가능한 EGR 범위에서 off-road 차량 평가 모드인 KC1-8mode와 NRTC(Non road transient cycle) mode를 적용하여 출력, 연비, 배기 영향을 평가하였다.

Fig. 3은 Tier 3에 사용되는 시험모드인 KC1-8 mode와 Tier 4 interim이후 적용되는 시험모드인 NRTC 모드를 보여준다.

3. 실험결과

3.1 EGR의 영향

디젤 엔진에서의 EGR은 연소된 배기가스를 흡기로 공급하여 연소실내부의 잉여공기를 줄임으로써 연소과정에서 발생하는 NOx의 발생을 억제한다. 따라서 EGR율이 높으면 높을수록 NOx의 저감효율도 증가한다. 그러나 PM은 NOx와 trade off 관계에 있기 때문에 오히려 증가된다. Fig. 4는 1000rpm과 1200rpm의 중부하 조건에서 EGR을 변화에 따른 매연의 농도 변화를 보여준다. EGR이 전혀 적용되지 않은 경우 광투과식 매연 농도 측정기에 의해 측정된 값은 각각 1.76, 2.68이나 EGR율을 각각 25%, 22%를 적용하였을 때 매연농도는 2.67, 4.68로 크게 증가한다. 또한 Fig. 5는 1000rpm에서 EGR율을 25%까지 증가시켰을 때 매연농도와 NOx의 상관관계를 보여준다. 이때 NOx는 230ppm에서 145ppm으로 크게 떨어짐을 알 수 있다.

EGR율은 배기매니폴드와 흡기 매니폴드와의 차압에 의해 최대 공급 가능 값이 결정되나 EGR 공급에 따른 흡기의 온도 제약이나 THC의 증가도 EGR율을 제한하는 인자로 작용한다.⁽⁸⁾

Fig. 6은 1400rpm의 40%부하 조건에서 EGR을 증가에 따른 성능인자 및 주변특성에 대한 변화를 나타낸 것이다.

EGR 적용시 연소실 내의 과잉산소의 감소로 인해 NOx는 EGR을 증가에 따라 감소하는 일반적인 경향을 보인다. 반면 THC 배출량은 증가하는데 이는 EGR에 의해 감소된 과잉산소 때문에 불완전연소가 일어나 매연과 함께 미연화탄화수소가 증가되기 때문이다.

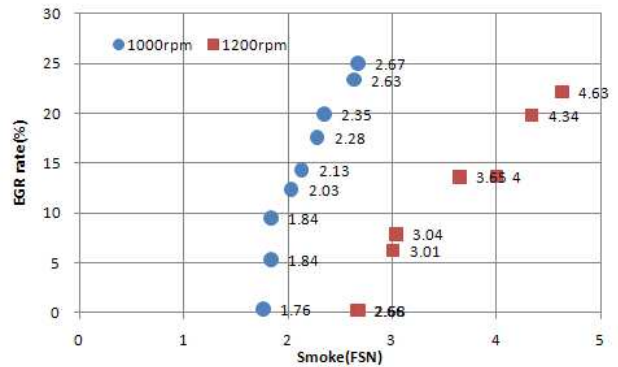


Fig. 4 Relation ship of EGR rate and smoke

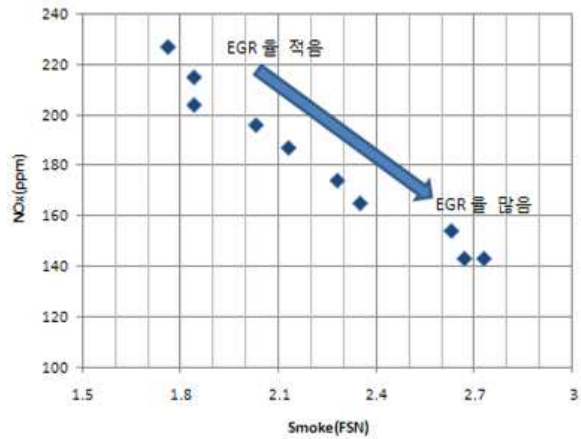


Fig. 5 Relation ship of smoke and NOx

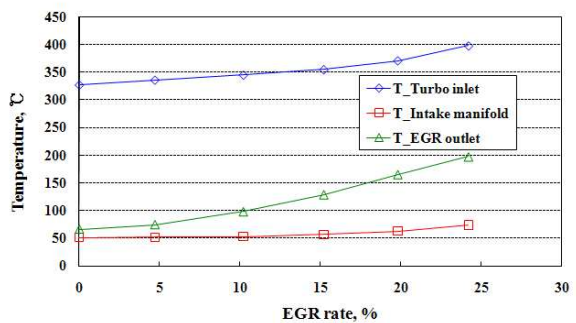
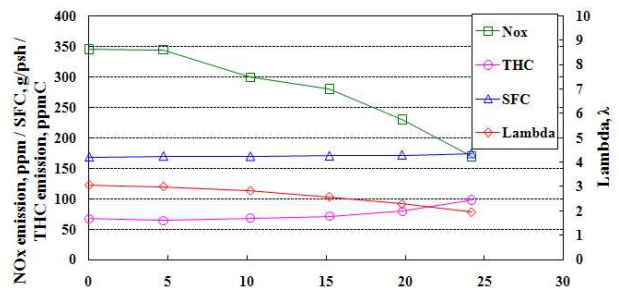


Fig. 6 The effect of EGR for the engine performances and the temperature in intake and EGR pipe

또한 EGR을 증가에 따른 흡기 매니폴드 내 배기가스 유량 증대로 흡기의 온도가 증가하는데 이러한 경향은 엔진회전수가 증가할수록 현저하게 나타난다. 트랙터의 경우 인터쿨러 미장착으로 흡기의 냉각효과가 없기 때문에 과도한 EGR을 하는 경우 흡입온도가 과도하게 높아져 체적효율의 감소와 함께 출력감소, 연료소모량 증가, THC 배출가스 증가를 가져온다. 또한 고온으로 인한 EGR 밸브의 파손도 발생할 수 있기 때문에 이를 방지하기 위해 밸브가 안전하게 작동될 수 있도록 적정 EGR율이 요구된다.

3.2 NOx 배출량 및 EGR 적용영역

EGR은 터보차저의 전단과 흡기매니폴드 사이의 압력차에 의해 배출가스가 이동하며 부하가 작은 저부하 영역에서 압력차가 크기 때문에 높은 EGR율을 얻을 수 있다. 반면 NOx 배출량이 많은 고부하의 경우 터보차저에 의한 과급이 크기 때문에 상대적으로 압력차가 적어 높은 EGR율을 기대하기 어려우며 NOx 저감효율도 떨어질 수밖에 없다.

Fig. 7은 엔진 운전영역에서 발생하는 NOx의 배출특성을 보여준다. NOx 배출량은 최대토크가 발생하는 1400rpm영역에서 약 1000ppm 정도로 높으며 엔진회전수가 증가할수록 배출량은 조금 감소하는 경향을 보이나 부하가 증가할수록 크게 증가하는 경향을 보여준다.

Fig. 8은 배기 매니폴드와 흡기 매니폴드의 압력차, EGR 공급시 흡기온도 상승 및 THC 증가를 참고하여 작성한 기본 EGR율 맵을 보여준다. 엔진회전수에 따라 저부하 영역의 경우 EGR율은 약 30%정도 적용이 가능하며 부하가 증가함에 따라 적용 가능한 EGR율은 감소하며 특히 전부하 경우 EGR율이 미미한 것을 볼 수 있다. 이는 앞에서 언급한 바와 같이 터보 차저 전단 압력과 흡기 매니폴드 내 압력 차, 배기가스 순환량 증대에 따른 흡기관 내의 고온화 등에 기인한다.

Fig. 9는 EGR을 적용한 경우의 NOx 배출량을 나타낸 것이다. EGR을 하지 않은 Fig. 7과 비교하면 NOx 저감율은 운전영역에 따라 약 20~40% 정도 저감율을 보인다. 특히 중부하 영역에서 저감율이 높은 것으로 나타났다.

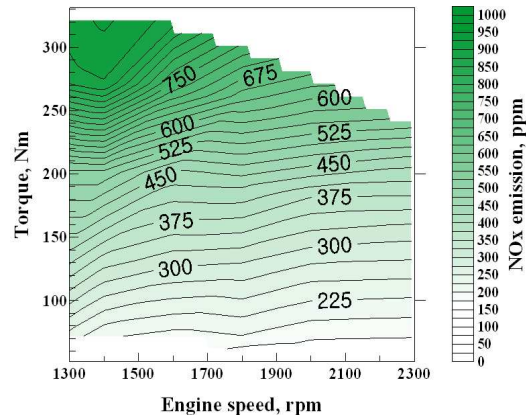


Fig. 7 The NOx emission with various engine driving conditions

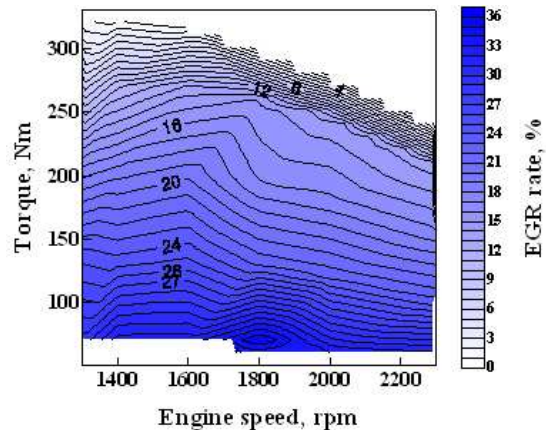


Fig. 8 EGR map for operating range

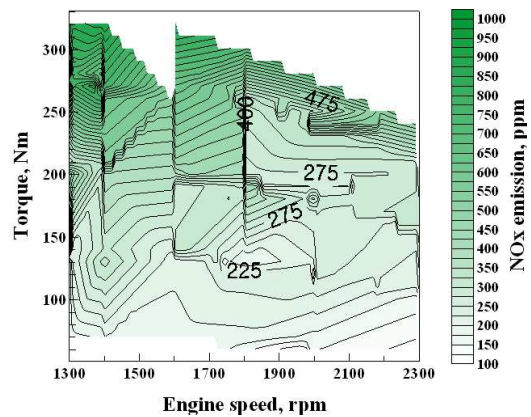


Fig. 9 NOx emission with EGR

3.3 DPF시스템 적용시 배출가스 특성

Off-road 차량의 경우 Tier 3까지는 정상운전모드인 KC1-8모드를, Tier 4 interim이상에서는 과도 운전 모드인 NRTC 모드를 사용한다.

Table 4 Power, BSFC and dP results

SPEED (rpm)	EGR			EGR+DPF		
	Power	BSFC	dP	power	BSFC	dP
2300	-2.10%	0.70%	-10%	-1.75%	4.80%	241%
1400	-0.40%	-1.20%	4.5%	-2.13%	4.00%	212%

Table 5 Test results of NRTC

	CO (g/kWh)	THC (g/kWh)	NOx (g/kWh)	PM (g/kWh)	POWER (kW)
BASE	1.500	0.371	5.481	0.1	7.846
DPF	0.000	0.066	5.196	0.035	7.808
DPF-EGR (duty 80%)	0.014	0.062	2.436	0.059	7.740
DPF-EGR (duty 80~95%)	0.208	0.048	2.948	0.022	7.785
Tier 4 interim	5.0	0.19	3.4	0.02	

Table 4는 KC1-8모드의 운전조건인 1400rpm과 2300rpm에서 EGR 및 DPF를 적용하였을 때 출력 및 연비손실을 비교하여 나타내었다. 출력의 경우 EGR만 적용한 경우와 DPF를 동시에 적용한 경우를 비교해보면 0.4% ~ 2.13%로 비슷한 감소량을 보이나 연비 측면에서는 확연한 차이를 나타낸다. EGR만 적용한 경우 1%미만의 연료소모량 증가가 일어나나 DPF를 동시에 적용할 경우 4% ~ 4.8%까지 크게 증가한다. 출력저하에 비해 연료소모량 증가가 크게 나타나는 것은 배압이 200% 이상 증가하기 때문에 이로 인한 출력손실을 회복하기위해 연료가 과도하게 공급되었기 때문이다.

Table 5는 NRTC 모드에서 베이스 엔진 및 DPF 적용, EGR 적용에 따른 배출가스 및 출력특성을 비교하였다. DPF 적용한 경우 EGR 적용과 관계없이 CO, THC 모두 80%이상의 높은 저감효율을 나타낸다. NOx의 경우 DPF만 적용한 경우에도 5% 수준의 저감율을 나타내었는데 이는 배압증가에 따른 내부EGR 작용으로 저감효과가 나타난 것이다. 듀티비를 80%로 고정한 경우 EGR율은 운전조건에 따라 다르나 약 10%~30% 범위 내에서 변하며 NOx 저감효율은 55.6%로 높은 저감특성을 보이나 PM의 경우 DPF만 적용한 경우보다 오히려 크게 증가하였다. 이는 과도한 EGR 적용에 따른 불완전 연소에 의해 PM량이 증가한

것이다. 듀티비를 80% ~ 95%로 적절하게 조절한 경우 NOx 저감효율은 조금 떨어졌지만 PM 배출량은 Tier 4 interim 규제 치에 근접한 결과를 얻을 수 있었다.

4. 결 론

Off-road 차량용 디젤엔진의 배출가스 저감을 위해 EGR 시스템과 DPF 시스템을 적용하고 EGR율을 최적화 하여 실험한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

(1) EGR율의 증가에 따라 NOx 배출량은 감소하였으며 반면에 PM 배출량은 증가하는 경향을 보였다. 적용 가능한 EGR율은 터보전단 압력과 흡기 매니폴드의 압력차 이외에 THC의 증가와 흡기온도의 증가를 함께 고려해야 한다.

(2) WGT가 적용된 농기계용 엔진에서 고압 EGR을 적용하는 경우 터보 차저 전단 압력과 흡기 매니폴드 내 압력 차를 고려할 때 저부하 및 중부하 영역에서 EGR적용 범위가 넓기 때문에 NOx 저감에 유리하였으며 시험결과에서도 EGR율 25% 일때 37%의 NOx 저감효율을 얻을 수 있었다.

(3) EGR과 DPF 시스템을 적용하는 경우 출력 측면에서는 최대 2.13%의 손실로 비슷한 수준이었으나 연료소모량 측면에서는 EGR과 DPF를 동시에 적용하는 경우가 약 4.8%의 손실로 훨씬 크게 나타났다. 이는 DPF 적용에 따른 배압 증가로 발생하는 출력 저하를 막기 위해 과도한 연료가 공급되었기 때문에 출력저하는 상대적으로 낮았으나 연료소모량은 훨씬 크게 나타났다.

(4) Tier 4 interim 시험모드인 NRTC 모드를 통해 배출가스 특성을 분석해본 결과 DPF 적용과 동시에 EGR율을 운전조건에 맞춰 공급할 경우 PM은 최대 78%, NOx는 최대 55.6%를 저감할 수 있었다. NOx 배출량과 PM 배출량과의 상관관계를 이용하고 세부적인 제어시스템을 최적화를 할 경우 충분히 Tier 4 interim 규제치를 만족할 수 있을 것으로 예상된다.

후 기

본 연구는 무·저공해 자동차사업 Eco-star의 지원으로 수행되어졌으며 이에 감사드립니다.

참고문헌

- (1) Jeong, Y. and Kim, H., 2008, "Trend of Diesel Particulate Filter Trap Technology," *KSAE, Auto journal Vol. 30*, No. 1, pp. 55~61.
- (2) Vincent, M. W., Richards, P. J. and Rogers, T. J., 2002, "Effective Particulates Reduction in Diesel Engines through the Use of Fuel Catalyzed Particulate Filter," *Int. J. Automotive Technology*, Vol. 3, No. 1, pp. 1~8.
- (3) Kong, Y., Kozakiewicz, T., Hohnson, R., Huffmeyer, C., Huckaby, J., Abel, J., Baurley, J. and Duffield, K., 2005, "Active DPF Regeneration for 2007 Diesel Engines," SAE 2005-01-3509.
- (4) Langridge, S. and Fessler, H., 2002, "Strategies for High EGR Rates in a Diesel Engine," SAE 2002-01-0961.
- (5) Dronniou, N. and Higelin, P., 2005, "Combination of High EGR Rates and Multiple Injection Strategies to Reduce Pollutant Emissions," SAE 2005-01-3726.
- (6) Niemi, S. A., Lauren, M. J. and Murtonen, T. T., 2002, "Effect of Waste-Gate Turbocharging on the Exhaust Particulate Matter of an Off-Road Diesel Engine," 2002-01-2159.
- (7) Muller, M., 2008, "Estimation and Control of Turbocharged Engines," SAE 2008-01-1013.
- (8) Kang, J., Nam, D., Jeong, G., Cho, G., Jang, Y., Kim, M. and Park, S., 2010, "A Study on the Application of EGR System to Decrease the NOx emission of Off-Road Vehicle Diesel Engine," KSAE10- B0089(1).